

# КОМПЕНСАЦИОННЫЕ БАКИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Анатолий Семёнович Демидов, д.т.н., профессор кафедры конструкций и проектирования двигателей, Московский авиационный институт МАИ (национальный исследовательский университет)



ЯЭУ "ТОПАЗ"

*Ядерные энергетические установки, использующие жидкометаллический теплоноситель, непременно должны быть оборудованы устройствами, компенсирующими изменение объёма теплоносителя при изменении его температуры. Для энергоустановок, применяемых в космических системах, кроме требований к эксплуатационным качествам и безопасности, добавляются также требования минимального веса и компактности. Nuclear power plants using a liquid metal coolant must necessarily be equipped with devices that compensate for changes in the volume of the coolant when its temperature changes. For power plants used in space systems, to traditional performance and safety, minimal weight and compactness are also added.*

**Ключевые слова:** ЯЭУ, жидкометаллический теплоноситель, космические аппараты.  
**Keywords:** Nuclear power plant, liquid metal heat carrier, spacecraft.

Компенсационные баки обязательно входят в состав ядерных энергоустановок (ЯЭУ) с жидкометаллическим теплоносителем, так как обеспечивают пространство переменного объёма для этих теплоносителей при изменении их температуры, а также бескавитационную работу электромагнитных насосов. На американской ЯЭУ SNAP10A (рис. 1), запущенной в космос в 1965 году, компенсационный бак (КБ)

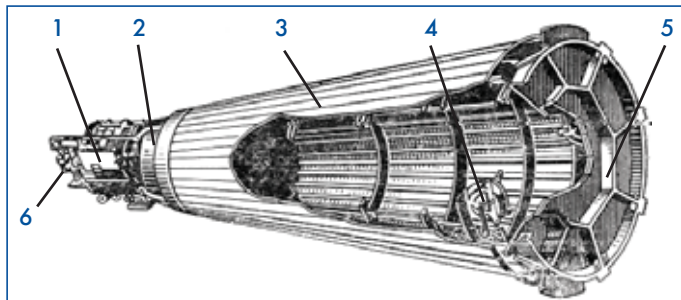


Рис. 1 Американская ЯЭУ SNAP10A:  
1 - реактор; 2 - радиационная защита; 3 - холодильник-излучатель; 4 - компенсационный бак; 5 - приборный отсек; 6 - термоэлектрический насос

имел простую цилиндрическую форму и с помощью треугольной рамки ассиметрично крепился к коническому гофрированному каркасу из титана во внутреннем пространстве холодильника-излучателя. Энергоустановка имела полезную мощность около 500 Вт при длине 3,65 м и максимальном диаметре 1,5 м [1]. На более крупных ЯЭУ подобные агрегаты располагались по-другому. Например, на серийных ЯЭУ Бук, которые запускались в космос с 1970 по 1989 год [2], два одинаковых цилиндрических КБ, относящихся к 1-му и 2-му жидкометаллическим контурам, симметрично размещались внутри трубка-

того стального каркаса холодильника-излучателя. Баки устанавливались таким образом, чтобы их оси были перпендикулярны оси симметрии энергоустановки. Это защищало сильфоны баков от перегрузки, возникающей при запуске стартовой площадки. В одноконтурной ЯЭУ ТОПАЗ (две таких энергоустановки были запущены в 1987 году) КБ имел приблизительно чечевичную форму. Бак размещался внутри безрамного холодильника-излучателя за узлом радиационной защиты

так, что его ось совпала с осью энергоустановки. Для повышения надежности внутри бака были последовательно установлены два силь-

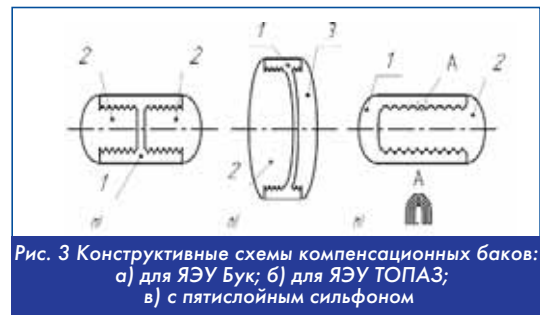


Рис. 3 Конструктивные схемы компенсационных баков: а) для ЯЭУ Бук; б) для ЯЭУ ТОПАЗ; в) с пятислойным сильфоном

фона, образующих три изолированных полости. Тем самым обеспечивалась работа бака даже при потере герметичности одного из сильфонов. Известны и другие конструкции компенсационных баков, например, с использованием многослойных сильфонов. Их применение позволяет иметь "мягкую" деформационно-силовую характеристику, а многослойный сильфон способен выдерживать достаточно высокое внутреннее давление. Конструктивные схемы некоторых компенсационных баков показаны на рис. 3.

Понятно, что в ЯЭУ 2-го поколения, которые могут иметь полезную мощность до нескольких сотен и более киловатт, объёмы компенсационных баков должны быть весьма значительными (типичная компоновка энергоблока современной ЯЭУ показана на рис. 2) [4]. Это приводит к необходимости уделять большое внимание вопросам компоновочных решений КБ как в общей структуре ЯЭУ, так и в конкретных конструктивных схемах. В связи с этим возникают также проблемы обеспечения деформационных характеристик сильфонов и их прочности в приемлемых габаритах и формах КБ. Определённый интерес может представлять бак так называемой тороидальной формы. Его продольное сечение представлено на рис. 4. Диафрагма, соединяющая наружный и внутренний сильфоны, показана в положении, когда объём жидкого металла в баке является минимальным. В структуру энергоблоков такие баки могут удачно встраиваться, поскольку

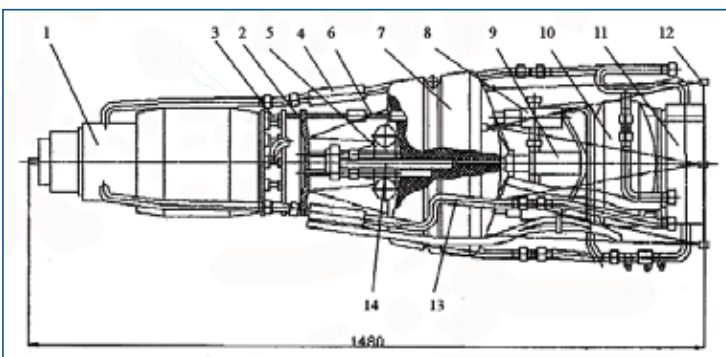


Рис. 2 Типичная компоновка энергоблока ЯЭУ: 1 - реактор-преобразователь (РП); 2 - "тяжелый" компонент защиты (уран-238); 3 - распределительный механизм; 4 - ампула подпитки; 5 - бак для сбора гелия; 6 - рессора органа регулирования РП; 7 - "легкий" компонент защиты (гидрид лития); 8 - привод управления РП; 9 - привод стержня безопасности (СБ); 10 - компенсационный бак; 11 - электромагнитный насос; 12 - плоскость стыка с космическим аппаратом; 13 - трубопровод; 14 - рессора СБ

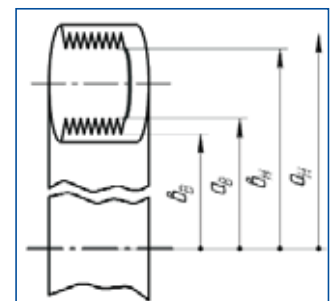


Рис. 4 Продольное сечение бака тороидальной формы



ку их проектные размеры легко изменять. В то же время при проектировании во избежание перекоса диафрагмы должна быть решена задача совмещения деформационных характеристик наружного и внутреннего сифонов. Рассмотрим ее решение на конкретном примере тремя способами. Зададимся размерами наружного сифона:

Радиус  $a_n = 300$  мм; радиус  $b_n = 240$  мм; толщина сифона  $h_n = 0,2$  мм. Здесь и ниже индексы "н" и "в" относятся к наружному и внутреннему сифонам соответственно. Условимся также, что температура жидкого металла в баках равна примерно  $650^{\circ}\text{C}$ , а конструкционным материалом сифонов и корпуса является сталь 10X18H10T, для которой модуль Юнга  $E = 1,1 \times 10^4$  кг/мм<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

В соответствии с принятой схемой, показанной на рис. 4, будем считать сифон состоящим из  $n$  плоских кольцевых пластин, по наружным и внутренним контурам соединенных сваркой.

Для расчета будем использовать формулы, приведенные в книге [3]:

$$W_{max} = k_1 \times P a^2 / E h^3, \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = k \times P / h^2, \quad (2)$$

где  $W_{max}$  и  $\sigma_{max}$  - максимальный прогиб и максимальное напряжение соответственно в кольцевой пластине с граничными условиями, показанными на рис.5;

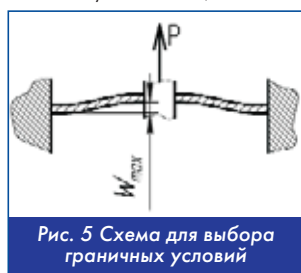


Рис. 5 Схема для выбора граничных условий

$P$  - осевая сила;  
 $k_1$  и  $k$  - безразмерные коэффициенты, зависящие от отношения радиусов  $a/b$  кольцевой пластины (см. таблицу 1) [3].

Таблица 1

$a/b$	1,25	1,5
$k$	0,115	0,220
$k_1$	0,00129	0,0064

### 1-й способ

Дополнительно к принятым выше условиям зададимся из конструктивных соображений наружным радиусом внутреннего сифона  $a_v = 230$  мм и той же величиной отношения  $a/b = 1,25$ , что и для наружного сифона. Следовательно, внутренний радиус внутреннего сифона  $b_v = 184$  мм. Неизвестной величиной является толщина внутреннего сифона  $h_v$ . Из тех же конструктивных соображений зададимся также количеством кольцевых пластин и суммарным перемещением ("ходом" сифона  $S$ ):

- в наружном сифоне  $n_n = 22$
- во внутреннем сифоне  $n_v = 22$
- ход сифона  $S = 44$  мм, чему соответствует  $W_{max} = 44/22 = 2$  мм.

Поскольку число пластин в обоих сифонах одинаково, для совпадения характеристик наружного и внутреннего сифонов должно выполняться равенство

$$(W_{max} / P)_n = (W_{max} / P)_v, \quad (3)$$

или с учетом выражения (1):

$$(a^2/h^3)_n = (a^2/h^3)_v. \quad (4)$$

Используя последнюю формулу, получаем  $h_v = 0,1675$  мм. Проверка по формуле (2) показала, что при  $W_{max}$  максимальное напряжение в пластинах наружного сифона составляет  $4,36$  кг/мм<sup>2</sup>, в пластинах внутреннего сифона  $6,04$  кг/мм<sup>2</sup>.

### 2-й способ

В этом случае зададимся толщиной внутреннего сифона  $h_v = 0,2$  мм и считая известным наружный радиус внутреннего сифона  $a_v = 230$  мм, будем определять его внутренний радиус. Для совпадения характеристик (3) должно выполняться равенство

$$(k_1 a^2)_n = (k_1 a^2)_v. \quad (5)$$

Подставляя в него  $k_1 = 0,00129$  для кольцевых пластин наружного сифона из таблицы 1,  $a_n = 300$  мм и  $a_v = 230$  мм, определяем для кольцевых пластин внутреннего сифона  $k_1 = 0,00219$ . Используя данные таблицы 1, путем интерполяции находим, что для внутреннего сифона отношение  $a/b = 1,3$ . Отсюда внутренний радиус  $b_v = 230/1,3 = 177$  мм.

### 3-й способ

Условимся, что толщины кольцевых пластин в обоих сифонах одинаковы и равны  $0,2$  мм, что радиусы пластин  $a_n = 300$  мм;  $b_n = 240$  мм;  $a_v = 230$  мм;  $b_v = 184$  мм. Как и в предыдущих случаях, количество пластин наружного сифона примем  $n_n = 22$ , а для внутреннего это количество  $n_v$  должно быть определено из условия совпадения деформационных характеристик сифонов:

$$(W_{max} / P)_n \times n_n = (W_{max} / P)_v \times n_v. \quad (6)$$

Учитывая (1) и сократив одинаковые величины, получаем

$$(a^2)_n \times n_n = (a^2)_v \times n_v, \quad (7)$$

откуда расчетное количество пластин внутреннего сифона  $n_v$  получается равным  $37,43$ .

### Выводы:

1) Сравнение результатов расчетов показало, что наиболее технологичной является конструкция бака с сифонами, размеры которых были определены при расчете вторым способом, когда толщины обоих сифонов являются одинаковыми, а подбор нужных характеристик можно осуществлять только за счет внутреннего диаметра внутреннего сифона.

2) Очевидно, что подбор нужных характеристик можно также выполнять, задаваясь любыми тремя радиусами кольцевых пластин и определяя четвертый, при этом их толщины принимая в расчете одинаковыми.

3) Расчеты первым способом, когда определяется толщина пластин сифона, дают, как правило, неудобный для производства результат, который можно компенсировать некоторым изменением радиусов пластин. Также могут требоваться корректировки размеров пластин расчеты третьим способом.

4) В тех случаях, когда суммарные толщины пакетов пластин внешнего и внутреннего сифонов при полном их сжатии могут отличаться, во избежание возникновения перекоса диафрагмы под один из сифонов должно быть установлено специальное кольцо.

Необходимо заметить, что вследствие всегда имеющей место разнотолщинности пластин, из которых изготавливаются сифоны, корректировка их размеров часто оказывается необходимой.

В дополнение к вышеизложенному приведем схему бака торoidalной формы (рис.5), выполненную по типу показанной на рис.3б. Здесь полость наибольшего объема должна быть заполнена газом, две другие полости - жидкометаллическим теплоносителем. Особенность этой схемы заключается в том, что применяются два типоразмера сифонов. При их осевой деформации в каждой паре одинаковых сифонов один работает на сжатие, другой на расширение. Сокращения радиальных размеров сифонов, то есть ширины кольцевых пластин можно добиться за счет увеличения количества этих пластин. Как указывают авторы книги [3], при расчете такой кольцевой пластины можно учитывать только перерезывающую силу в вырезанной из кольца радиальной балочке. □

Автор выражает признательность студенту 5-го курса МАИ Артёму Суровежко за помощь в подготовке графического материала.

### Литература

- 1.Черкасский А.Х. Термоэлектрический насос. - М.: Машиностроение, 1971. - 216 с.
- 2.Космические ядерные энергоустановки и электроракетные двигатели. Конструкция и расчет деталей. Под ред. Андреева П.В. - М.: Изд-ство МАИ, 2014. - 507 с.
- 3.Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. - М.: Наука, 1966. - 635 с.
- 4.Конструктивные подходы к проектированию космических ЯЭУ / А.Г. Еремин, Л.С. Коробков, А.П. Пышко, Е.М. Страхов // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 3. С. 225 - 226.

Связь с автором: demidov@mai.ru

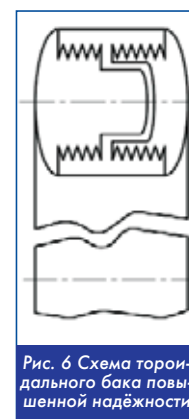


Рис. 6 Схема торoidalного бака повышенной надёжности